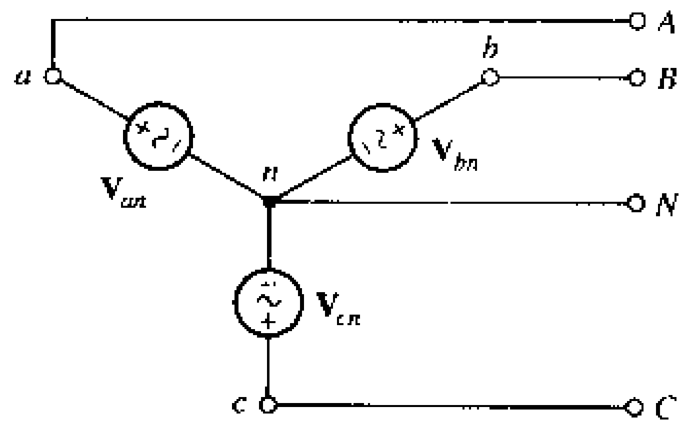

图 12.11 Y 形接法的三相四线源

前者称为正相序列,或 abc 相序列,见图 12.12(a);后者称为负相序列,或者 cba 相序列,它的相量图见图 12.12(b)。三相源的实际相序列依赖于对三个端点 a,b,c 的选择。可以按照总是保持正相序列的要求来选择它们,在我们所研究的大多数系统中都假定是正相位系统。

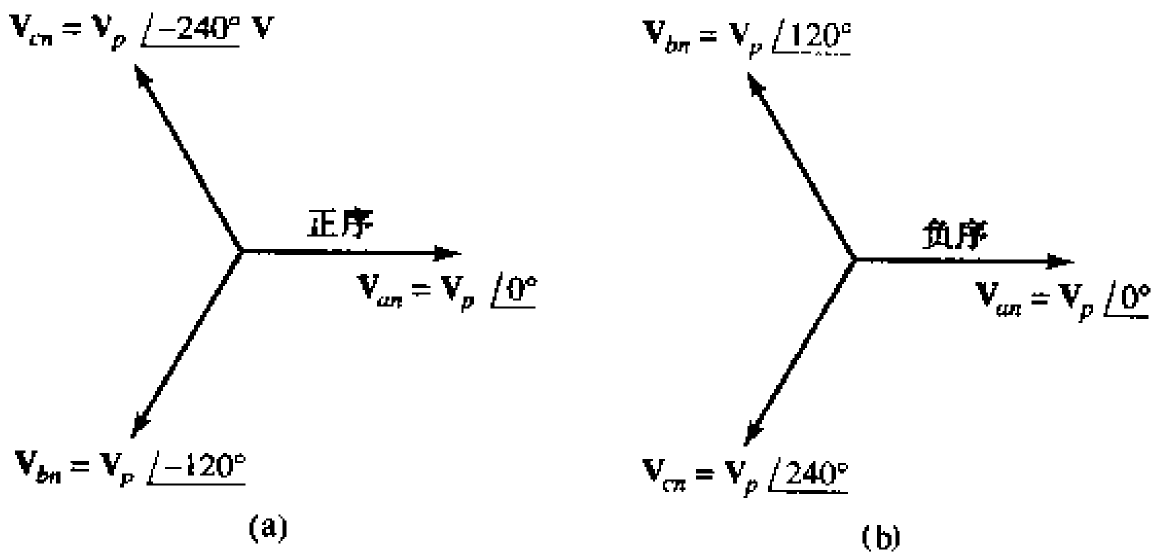

图 12.12 (a)正的或 abc 相序列;(b)负的或 cba 相序列

12.4.1 边线到边线的电压

接下来考虑边线到边线的电压(经常简称为线电压),当相电压是图 12.12(a)所示的电压时,可以画出线电压。由于角度都是 30°的倍数,所以使用相量图很容易做到这一点。它们的结构如图 12.13 所示。

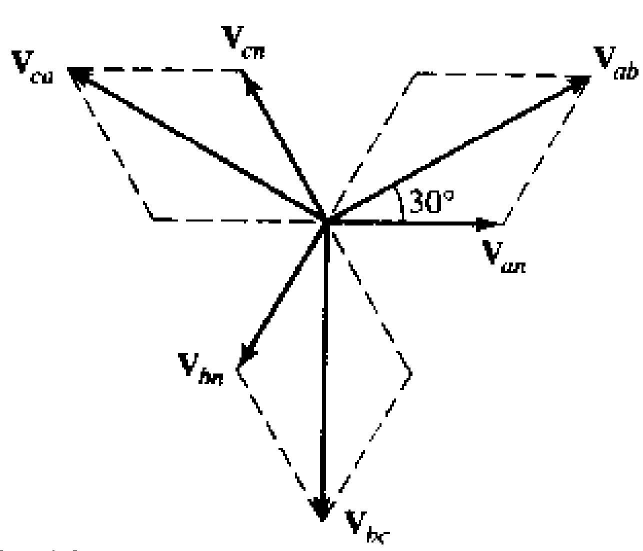

图 12.13 通过已知的相电压求出线电压的相量图,$\mathbf{V}_{ab} = \mathbf{V}_{an} - \mathbf{V}_{bn} = V_p \angle 0° - V_p \angle -120°$

$$= V_p - V_p\cos(-120°) - jV_p\sin(-120°) = V_p\left(1 + \frac{1}{2} + j\sqrt{3}/2\right) = \sqrt{3}\,V_p \angle 30°$$

结果为：

$$\mathbf{V}_{ab}=\sqrt{3}V_p\underline{/30^\circ}\tag{12.1}$$

$$\mathbf{V}_{bc}=\sqrt{3}V_p\underline{/-90^\circ}\tag{12.2}$$

$$\mathbf{V}_{ca}=\sqrt{3}V_p\underline{/-210^\circ}\tag{12.3}$$

基尔霍夫电压定律要求，这三个电压的和应为零，读者可以把这个作为练习加以证明。

如果任何一个线电压的有效值用 V_L 表示，则 Y 形三相源的连接的一个重要特征可以表述为：

$$V_l=\sqrt{3}V_p$$

注意到在正相序列中，$\mathbf{V}_{an}$ 超前 $\mathbf{V}_{bn}$ 120°，$\mathbf{V}_{bn}$ 超前 $\mathbf{V}_{cn}$ 120°；同样，$\mathbf{V}_{ab}$ 到 $\mathbf{V}_{bc}$，$\mathbf{V}_{bc}$ 到 $\mathbf{V}_{ca}$，也是相差 120°。如果把超前换成滞后，该命题就适用于负相序列。

现在，把平衡的 Y 形接法的三相负载连接到电源上，使用三个边线和一个中线，如图 12.14 所示。负载用 $\mathbf{Z}_p$ 表示，连在每个边线与中线之间。三个边线的电流可以很容易求得，因为这就像三个单相电路，它们具有共同的导线①：

$$\mathbf{I}_{aA}=\frac{\mathbf{V}_{an}}{\mathbf{Z}_p}$$

$$\mathbf{I}_{bB}=\frac{\mathbf{V}_{bn}}{\mathbf{Z}_p}=\frac{\mathbf{V}_{an}\underline{/-120^\circ}}{\mathbf{Z}_p}=\mathbf{I}_{aA}\underline{/-120^\circ}$$

$$\mathbf{I}_{cC}=\mathbf{I}_{aA}\underline{/-240^\circ}$$

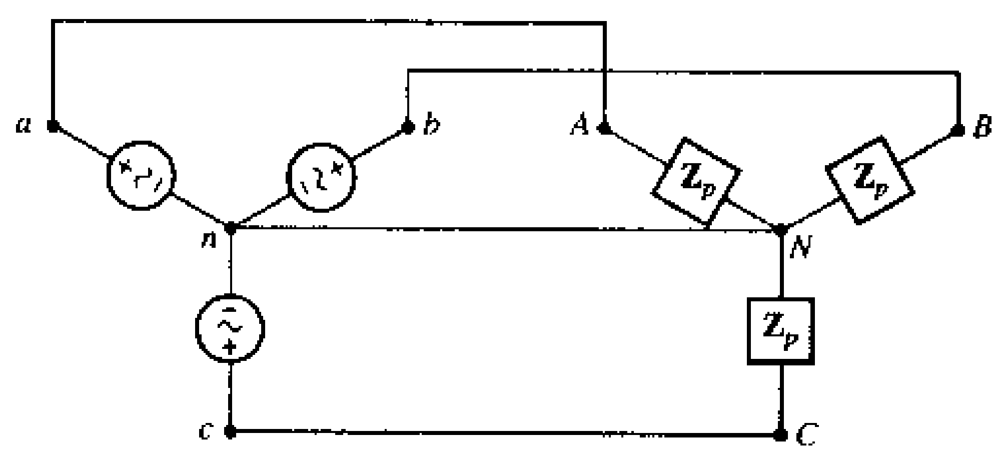

图 12.14　一个平衡的三相系统，使用 Y-Y 形接法，包含中线

所以：

$$\mathbf{I}_{Nn}=\mathbf{I}_{aA}+\mathbf{I}_{bB}+\mathbf{I}_{cC}=0$$

这样，当源和负载都是平衡的，并且四根线都是零阻抗时，中线上没有电流通过。如果在每个边上都加一个阻抗 $\mathbf{Z}_L$，在中线上加一个阻抗 $\mathbf{Z}_n$，会有什么变化呢？边线上的阻抗可以和负载结合在一起；这些有效的负载仍是平衡的，中线就可以去掉。因此，如果 n 和 N 之间短路或断路时，系统都不会有什么变化，那么可以在中线上加上任意的阻抗，中线的电流始终保持为零。

由此，如果有平衡源、平衡负载以及平衡线阻抗，任意阻抗的中线都可以被其他任意阻抗所代替，包括断路或短路；替换不会影响系统的电压或电流。在两个中性点之间，不论是否有

① 应用叠加原理，每次考察一个相，就可以证实这一点。

中线的存在,把它想像成一条短路线是很有帮助的,这样问题就简化成三个单相的问题,它们除了相角不同外,其他都一样,可以说这是"按相"解决问题。

例题 12.2 对于图 12.15 所示的电路图,求通过整个电路的电流和电压,并计算负载消耗的总功率

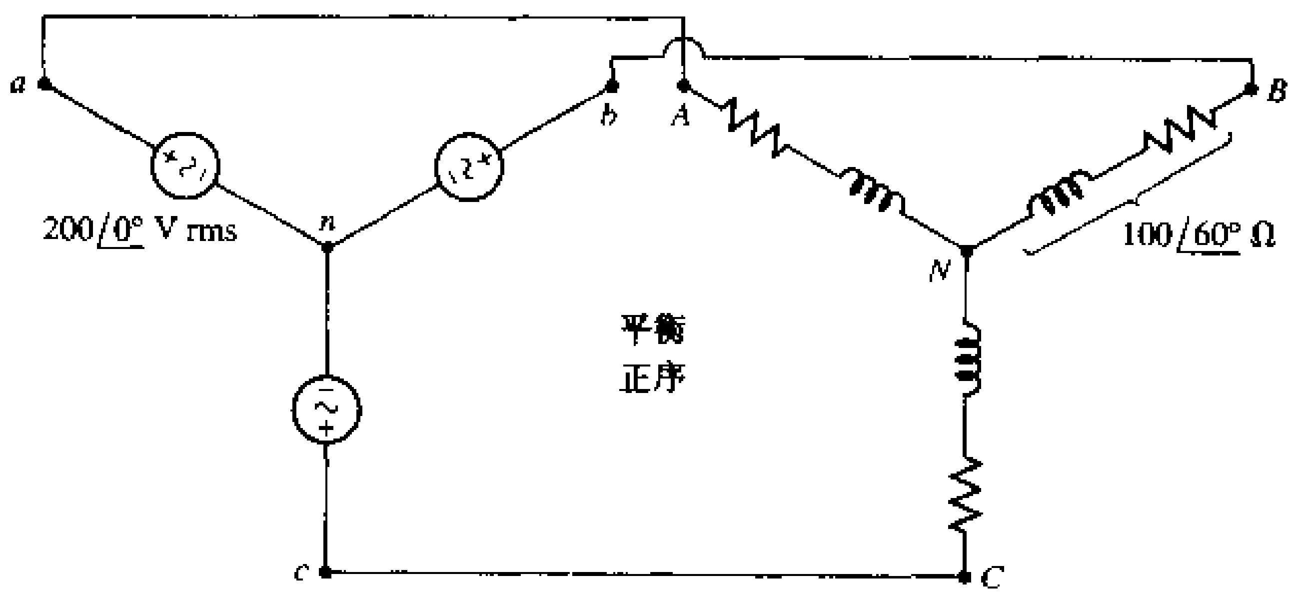

图 12.15 Y-Y 形接法的三相三线系统

既然其中一个电源的相电压已经给出,而且是正相序列,这三个相电压可以表示为:

$$\mathbf{V}_{an} = 200\,\underline{/0^\circ}\text{ V} \qquad \mathbf{V}_{bn} = 200\,\underline{/-120^\circ}\text{ V} \qquad \mathbf{V}_{cn} = 200\,\underline{/-240^\circ}\text{ V}$$

线电压为 $200\sqrt{3} = 346$ V;每个线电压的相角可由相量图求出来,如图 12.13 所示(事实上,图 12.13 的相量图是一个比较适用的图),用计算器减去相电压,或者在式(12.3)引用式(12.1)。可以求得 $\mathbf{V}_{ab} = 346\,\underline{/30^\circ}$ V, $\mathbf{V}_{bc} = 346\,\underline{/-90^\circ}$ V, $\mathbf{V}_{ca} = 346\,\underline{/-210^\circ}$ V。

现在来解相 A,它的线电流为:

$$\mathbf{I}_{aA} = \frac{\mathbf{V}_{an}}{\mathbf{Z}_p} = \frac{200\,\underline{/0^\circ}}{100\,\underline{/60^\circ}} = 2\,\underline{/-60^\circ}\text{ A}$$

由于已知这是一个平衡的三相系统,根据 $\mathbf{I}_{aA}$ 很容易写出剩下的两个线电流:

$$\mathbf{I}_{bB} = 2\,\underline{/(-60^\circ - 120^\circ)} = 2\,\underline{/-180^\circ}\text{ A}$$

$$\mathbf{I}_{cC} = 2\,\underline{/(-60^\circ - 240^\circ)} = 2\,\underline{/-300^\circ}\text{ A}$$

相 A 消耗的功率为:

$$P_{AN} = 200 \times (2)\cos(0^\circ + 60^\circ) = 200\text{ W}$$

因此,三相负载的总平均功率就是 600 W。

该电路的相量图如图 12.16 所示。一旦知道了任意一个线电压的大小和任意一个线电流的大小,则通过相量图,所有的三个电压和所有的三个电流的相角就很容易求出。

练习

12.4 一个平衡三相三线系统,有 Y 形接法的负载,每一个相都是三个负载的并联: $-j100\ \Omega$, $100\ \Omega$, 和 $50 + j50\ \Omega$。假设是正相序列,并有 $\mathbf{V}_{ab} = 400\,\underline{/0^\circ}$。求:(a) $\mathbf{V}_{an}$;(b) $\mathbf{I}_{aA}$;(c)负载的总功率。

答案:$231\,\underline{/-30^\circ}$ V; $4.62\,\underline{/-30^\circ}$ A; 3 200 W

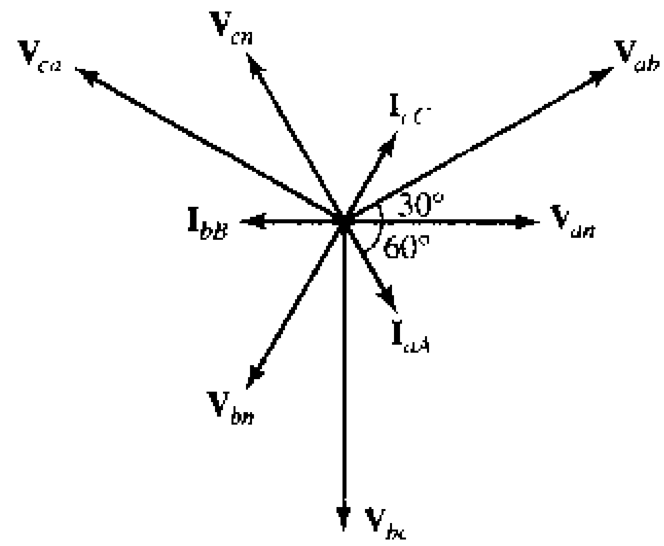

图 12.16　图 12.15 的电路图的相量图

在下一个例题之前，先分析一下 12.2 节的一个命题，即虽然相电压和相电流在某个时间瞬时为零(在美国，每 1/120 s 一次)，但是总负载所消耗的瞬时功率从不为零。再一次考虑例题 12.2 的相 A，把相电压和相电流在时间域里写出来：

$$v_{AN} = 200\sqrt{2}\cos(120\pi t + 0°)\ \text{V}$$

和

$$i_{AN} = 2\sqrt{2}\cos(120\pi t - 60°)\ \text{A}$$

于是，相 A 的瞬时功率为：

$$\begin{aligned} p_A(t) = v_{AN}i_{AN} &= 800\cos(120\pi t)\cos(120\pi t - 60°) \\ &= 400\left[\cos(-60°) + \cos(240\pi t - 60°)\right] \\ &= 200 + 400\cos(240\pi t - 60°)\ \text{W} \end{aligned}$$

同样的方法，可以得到：

$$p_B(t) = 200 + 400\cos(240\pi t - 300°)\ \text{W}$$

和

$$p_C(t) = 200 + 400\cos(240\pi t - 180°)\ \text{W}$$

所以总负载所消耗的瞬时功率为：

$$p(t) = p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) = 600\ \text{W}$$

它与时间无关，这与例题 12.2 所求出的平均功率相同。

例题 12.3　一个平衡的三相系统，线电压为 300 V，它给一个平衡的 1 200 W 的 Y 形接法的负载供电，其功率因数为 0.8(超前)。求线电流及每一相负载的阻抗

相电压是 $300/\sqrt{3}$ V，每一相的功率为 1 200/3 = 400 W。因此，线电流可以从功率的关系式求出：

$$400 = \frac{300}{\sqrt{3}}(I_L)\times(0.8)$$

得到线电流为 2.89 A。每相的阻抗由下式给出：

$$|\mathbf{Z}_p| = \frac{V_P}{I_L} = \frac{300/\sqrt{3}}{2.89} = 60\ \Omega$$

因为功率因数为超前的 0.8，阻抗的相角是 $-36.9°$，因此 $\mathbf{Z}_p = 60\underline{/-36.9°}\ \Omega$。

既然问题可以简化成较为简单的单相问题,所以可以方便地处理更为复杂的负载问题。

练习

12.5 一个平衡三相三线系统,线电压为500 V。有两个平衡的Y形连接的负载。其中一个是容性负载,每相为 $7-j2\ \Omega$;另一个是感性负载,每一相为 $4+j2\ \Omega$。求:(a)相电压;(b)线电流;(c)负载消耗的总功率;(d)电源的功率因数。

答案:289 V; 97.5 A;83.0 kW; 0.983 (滞后)

例题 12.4 一个平衡的600 W照明负载并联在例题12.3的系统上。求线电流

首先画出适当的单相电路图,如图12.17所示。假设600 W负载是一个平衡负载,平均分布在三个相线上,则每一相消耗的功率为200 W。

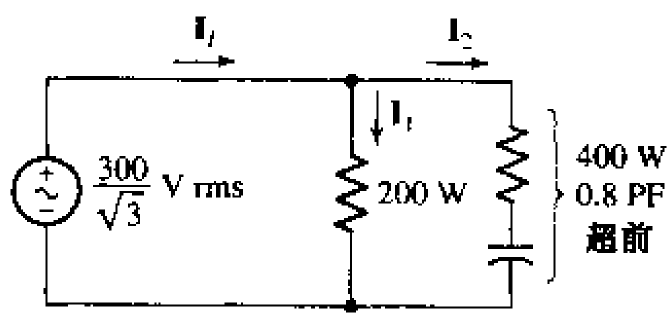

图 12.17 用来分析平衡三相系统每一相的电路

照明电流的幅度可以由下式求出:

$$200=\frac{300}{\sqrt{3}}\,|\mathbf{I}_1|\cos 0°$$

所以:

$$|\mathbf{I}_1|=1.155\ \mathrm{A}$$

同理,因为加在容性负载两端的电压没有改变,所以流过它的电流幅度也没有变化:

$$|\mathbf{I}_2|=2.89\ \mathrm{A}$$

如果假设所使用的相电压的相角为零,则:

$$\mathbf{I}_1=1.155\underline{/0°}\ \mathrm{A}\qquad \mathbf{I}_2=2.89\underline{/+36.9°}\ \mathrm{A}$$

线电流为:

$$\mathbf{I}_L=\mathbf{I}_1+\mathbf{I}_2=3.87\underline{/+26.6°}\ \mathrm{A}$$

还可以得到电源的这一相所产生的功率为:

$$P_p=\frac{300}{\sqrt{3}}\times 3.87\cos(+26.6°)=600\ \mathrm{W}$$

这与事实吻合,即各相为照明负载提供200 W功率,同时向原负载提供400 W功率。

练习

12.6 一个平衡三相四线系统,接有三个平衡Y形接法的负载。负载1消耗的功率为6 kW,PF=1;负载2需要10 kVA,PF=0.96(滞后);负载3需要7 kW,PF=0.85(滞后)。负载的相电压为135 V,如果每边线的导线电阻为0.1 Ω,中线的电阻为1 Ω,求:(a)负载的总功耗;(b)负载的总PF;(c)四条线上的总功率损耗;(d)源的相电

压;(e)源的功率因数。

答案:22.6 kW; 0.954(滞后);1 027 W; 140.6V; 0.957(滞后)

如果非平衡 Y 形接法的负载接在原来平衡的三相系统上,有中线,且它的阻抗为零,则仍可用单相分析法来分析它。如果这两个条件中缺少任何一个,就必须使用其他的方法,如网孔或节点分析法。然而,长期与非平衡三相系统打交道的工程师发现,对称组件分析法是一个更为有效的方法,不过这里不介绍这种方法。

12.5 Δ 形接法

与 Y 形接法相对应,还有 Δ 形接法,见图 12.8 所示。这种接法很普遍,它不需要中线。

现在考虑一个平衡 Δ 形负载,每边上的阻抗是 $\mathbf{Z}_p$,参考图 12.18,假设知道了线电压:

$$V_L = |\mathbf{V}_{ab}| = |\mathbf{V}_{bc}| = |\mathbf{V}_{ca}|$$

或者知道了相电压:

$$V_p = |\mathbf{V}_{an}| = |\mathbf{V}_{bn}| = |\mathbf{V}_{cn}|$$

这里:

$$V_L = \sqrt{3}V_p \qquad 和 \qquad V_{ab} = \sqrt{3}V_p \underline{/30^\circ}$$

它们前面已经求出。

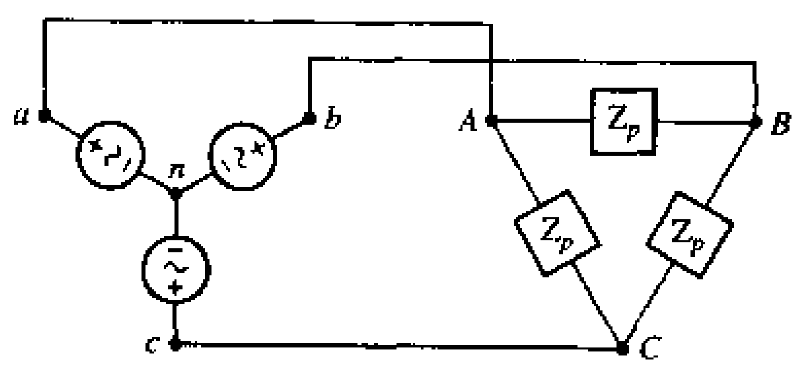

图 12.18　平衡的 Δ 形负载连在三相三线系统上,电源是 Y 形接法

因为已知 Δ 的每一支路的电压,很容易求出相电流:

$$\mathbf{I}_{AB} = \frac{\mathbf{V}_{ab}}{\mathbf{Z}_p} \qquad \mathbf{I}_{BC} = \frac{\mathbf{V}_{bc}}{\mathbf{Z}_p} \qquad \mathbf{I}_{CA} = \frac{\mathbf{V}_{ca}}{\mathbf{Z}_p}$$

它们的差就是线电流,例如:

$$\mathbf{I}_{aA} = \mathbf{I}_{AB} - \mathbf{I}_{CA}$$

因为处理的是平衡系统,因此相电流是等幅的:

$$\mathbf{I}_p = |\mathbf{I}_{AB}| = |\mathbf{I}_{BC}| = |\mathbf{I}_{CA}|$$

线电流也是等幅的,从图 12.19 的相量图明显看出它们的对称性。因此:

$$I_L = |\mathbf{I}_{aA}| = |\mathbf{I}_{bB}| = |\mathbf{I}_{cC}|$$

和

$$I_L = \sqrt{3}I_p$$

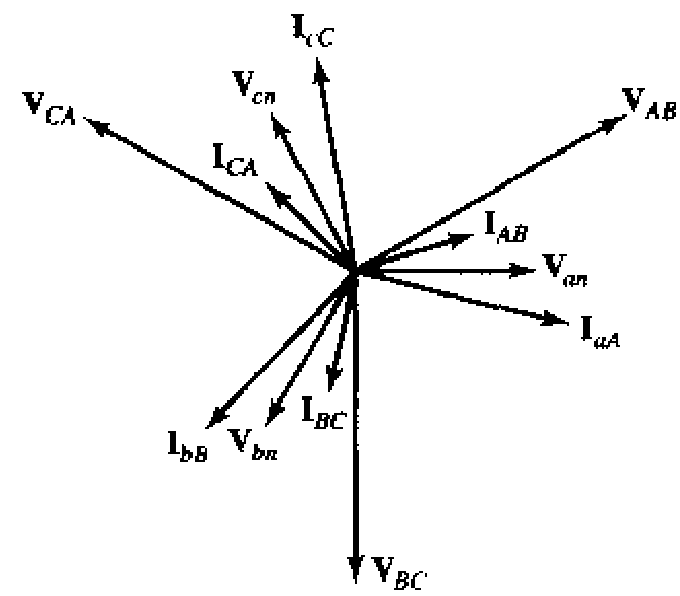

图 12.19 一个用于图 12.18 电路的相量图，假定 $\mathbf{Z}_p$ 为电感阻抗

现在暂时忽略电源，仅考虑平衡负载。如果负载是 Δ 形接法，则相电压和线电压是没有区别的，但是线电流却是相电流的$\sqrt{3}$倍；对于 Y 形负载，相电流和线电流是相同的，而线电压是相电压的$\sqrt{3}$倍。

例题 12.5 一个三相系统中，线电压是 300 V，向一个 Δ 形负载供电，0.8(滞后)。求线电流的幅度

同样，先来考虑单个相。它的功率为 400 W，PF = 0.8(滞后)，线电压为 300 V。因此：

$$400 = 300(I_p) \times (0.8)$$

和

$$I_p = 1.667 \text{ A}$$

根据相电流和线电流的关系可知：

$$I_L = \sqrt{3} \times (1.667) = 2.89 \text{ A}$$

另外，负载的相角是 $\cos^{-1}(0.8) = 36.9°$，所以每相的阻抗就是：

$$\mathbf{Z}_p = \frac{300}{1.667}\underline{/36.9°} = 180\,\underline{/36.9°}\ \Omega$$

练习

12.7 平衡三相 Δ 形负载的每一相由一个 0.2 H 的电感，一个 5 μF 的电容和一个 200 Ω 的电阻组成，其中电容与电阻并联，然后再与电感串联。假设导线的电阻为零，并且相电压为 200 V，ω = 400 rad/s。求：(a)相电流；(b)线电流；(c)负载的总功率。

答案：1.158 A；2.01 A；693 W

例题 12.6 一个三相系统，线电压为 300 V，向一个 PF = 0.8(滞后)的 Y 形负载提供1 200 W的功率。求三相系统的线电流的幅度(这与例题 12.5 的电路一样，只不过负载是 Y 形负载)

对于某个单相，可以得到相电压为 $300/\sqrt{3}$ V，功率为 400 W，PF 为 0.8(滞后)。因此：

$$400 = \frac{300}{\sqrt{3}}(I_p) \times (0.8)$$

和

$$I_p = 2.89 \qquad 或 \qquad I_L = 2.89 \text{ A rms}$$

负载的相角仍为 36.9°,因此 Y 形负载每相的阻抗是:

$$\mathbf{Z}_p = \frac{300/\sqrt{3}}{2.89} \angle 36.9^\circ = 60 \angle 36.9^\circ \ \Omega$$

因子$\sqrt{3}$不仅将各相的量与各线的量联系起来,而且还出现在平衡三相负载总功率的公式中。如果假设 Y 形负载的功率因数的相角为 θ,则各相的功率为:

$$P_p = V_p I_p \cos\theta = V_p I_L \cos\theta = \frac{V_L}{\sqrt{3}} I_L \cos\theta$$

总功率为:

$$P = 3P_p = \sqrt{3} V_L I_L \cos\theta$$

同样的方法,Δ 形负载每一相的功率为:

$$P_p = V_p I_p \cos\theta = V_L I_p \cos\theta = V_L \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos\theta$$

总功率为:

$$P = 3P_p$$
$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos\theta \tag{12.4}$$

借助于方程(12.4),再根据线电压的大小、线电流的大小以及负载阻抗(或导纳)的相角就可以计算出平衡负载的功率,而不论负载是 Y 形还是 Δ 形。现在可以通过简单的两步解出例题 12.5 和例题 12.6 的线电流:

$$1\,200 = \sqrt{3} \times (300) \times (I_L) \times (0.8)$$

所以:

$$I_L = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2.89 \text{ A}$$

练习

12.8　一个平衡的三相三线系统,端接两个并联的 Δ 形负载。负载 1 吸收的功率是 40 kVA,PF 为 0.8(滞后);负载 2 为 24 kW,PF 为 0.9(超前)。假设没有线电阻,令 $\mathbf{V}_{ab} = 440 \angle 30^\circ$ V。求:(a)负载的总功率;(b)滞后负载的相电流 $\mathbf{I}_{AB1}$;(c)$\mathbf{I}_{AB2}$;(d)$\mathbf{I}_{aA}$。
答案:56.0 kW; $30.3 \angle -6.87^\circ$ A; $20.2 \angle 55.8^\circ$ A; $75.3 \angle -12.46^\circ$ A

12.5.1　Δ 形电源

电源也可以连接成 Δ 形。但这不是典型的,因为电源相位的轻微不同,就会导致 Δ 环内有大的电流循环。例如,假设三个单相电源是 $\mathbf{V}_{ab}$,$\mathbf{V}_{bc}$ 和 $\mathbf{V}_{cd}$。在把 d 和 a 连接以前,通过测量 $\mathbf{V}_{ab} + \mathbf{V}_{bc} + \mathbf{V}_{ca}$的总和来确定是否不平衡。假设结果的幅度是线电压的 1%。那么循环电流就约是线电压的 1/3% 除以源内阻。这个内阻会有多大呢? 它取决希望电源在可忽略的端电压下降时提供的电流。如果假设最大的电流导致了端电压 1% 的下降,那么循环电流就是最大电流的 1/3! 这就减少了有效电流的能力,并且也增加了系统的损耗。

还需要指出的是、平衡的三相源可以从 Y 形转换成 Δ 形、反之亦然，而又不会影响负载的电流或电压。线电压和相电压的关系如图 12.13 所示，这里的 $\mathbf{V}_{an}$ 参考相角为 0°。这种转换使得可以使用任何接法的电源，而负载关系都是正确的. 当然，在知道电源如何连接以前，不会知道电源的任何电压或电流。平衡三相负载可以在 Y 形和 Δ 形之间转换，它们的关系是：

$$Z_Y = \frac{Z_\Delta}{3}$$

这个公式值得记住。

实际应用

发电系统

有很多方法可以用来产生电能。例如，使用光电转换技术把太阳能直接转变成电能(太阳能电池)，就可以产生直流电源。尽管光电转换技术是一项非常环保的技术，但是光电转换方法成本太高，并且需要转换器把直流变成交流。其他方法，例如风力涡轮、地热、水力发电、原子能以及燃油发电机，相比较而言，都是很经济的. 在这些系统中，一个轴在原动力，如风力推进器、水力或蒸汽的涡轮片(见图 12.20)的推动下旋转。

图 12.20 加州 Altamont Pass 的风力发电机，包括了 7 000 个独立的风车

一旦原动力用于驱动轴旋转，有几种方式可以把机械能转变成电能。一种是同步发电机，如图 12.21 所示。这种机械包括两个主要的部分：一个是固定部分，称为定子；一个是转动部分，称为转子。线圈里流过直流的时候就会使得转子产生磁场。围绕定子的第二组线圈就会感应出一组三相电压。同步发电机名字的由来是因为交流电压产生的频率与机械转子的转动同步。

因为各种负载的增加和减少，对一个孤立发电机的实际电能需求是变化的，例如空调机的启动、电灯的开关等。理想情况下，发电机的输出电压与负载无关，但实际上并非如此。任意定子的相产生的电压 $\mathbf{E}_A$(起源于内部产生的电压)的大小为：

$$E_A = K\phi\omega$$

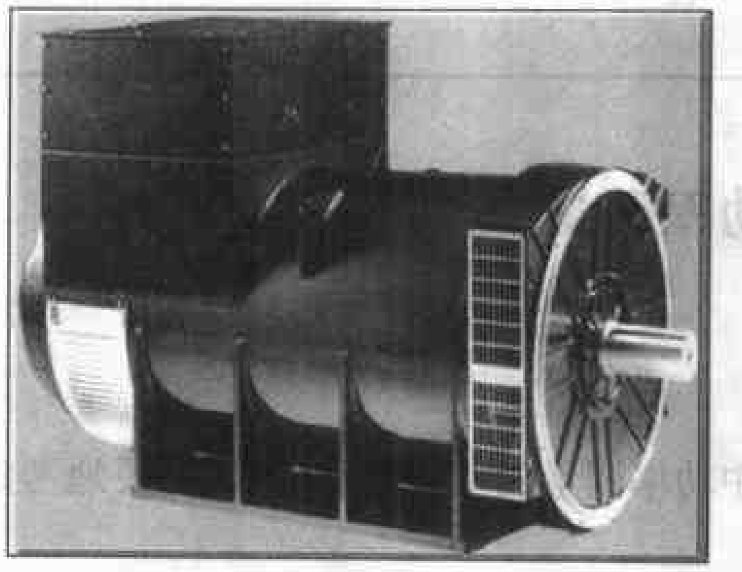

图 12.21　同步发电机的一个例子

这里的 K 是一个常数，由机器构造决定；ϕ 是围绕在定子上的磁场所产生的磁通量(因此与负载无关)；ω 是转速，它依赖于原动力而与负载无关。因此，改变负载不会影响 $\mathbf{E}_A$ 的大小。内部产生的电压与相电压 $\mathbf{V}_\phi$ 和相电流 $\mathbf{I}_A$ 的关系为：

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{V}_\phi + jX_S\mathbf{I}_A$$

这里的 X_S 是发电机的同步电抗。如果负载增加，就会需要发电机输出更大的电流 $\mathbf{I}'_A$。如果功率因数不变(即 $\mathbf{V}_\phi$ 和 $\mathbf{I}_A$ 间的角度不变)，由于 $\mathbf{E}_A$ 不变，那么 $\mathbf{V}_\phi$ 就会减少。

例如，考虑图 12.22(a)的相量图，它描述了一个发电机的单相电压－电流关系，其负载功率因数为滞后的 $\cos\theta$。内部生成的电压 $\mathbf{E}_A$ 也表示了出来。如果不改变功率因数，再加上一个负载，如图 12.22(b)所示，则电流 $\mathbf{I}_A$ 增加到 $\mathbf{I}'_A$。但是由相量 $jX_S\mathbf{I}_A$ 和 $\mathbf{V}'_\phi$ 之和产生的内部电压必须保持不变。因此 $\mathbf{E}'_A = \mathbf{E}_A$，发电机的输出电压($\mathbf{V}'_\phi$)稍微有所减少，如图 12.22(b)所示。

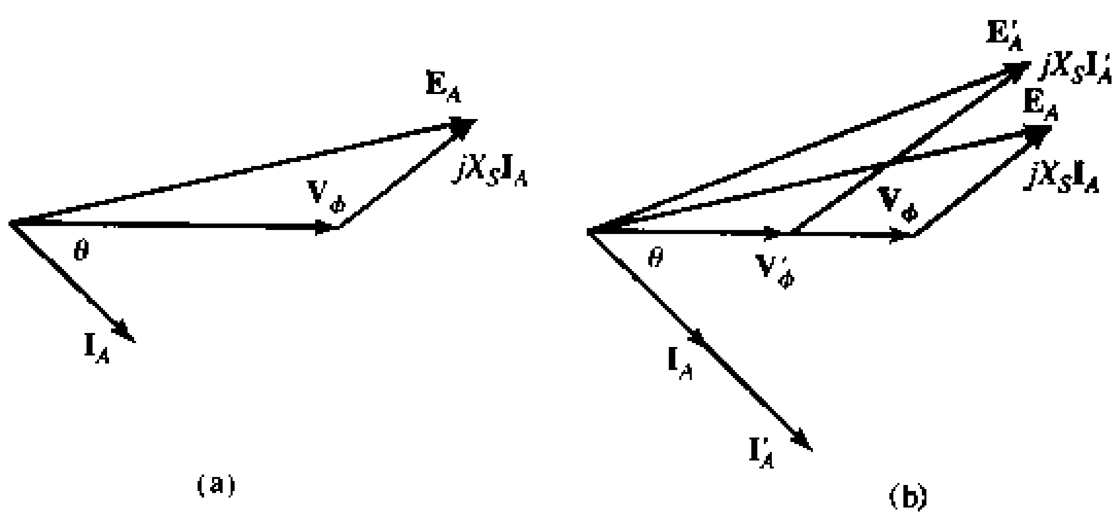

图 12.22　负载对独立的同步发电机影响的相量图：(a)发电机接在滞后功率因数为 $\cos\theta$ 的负载上；(b)增加负载但不改变功率因数。内部产生的电压大小保持不变、而输出电流增加，因此输出电压减少

发电机的电压调整率定义为：

$$\text{调整率}(\%) = \frac{V_{\text{no load}} - V_{\text{full load}}}{V_{\text{full load}}} \times 100$$

理想情况下，该值应尽可能的接近零，但是只有在改变控制磁通量 ϕ 的直流电流以补偿负载的条件下才能达到这个要求，这显然是很麻烦的。因此，当设计发电设备时，几个小的发电机并联比一个大的发电机能容纳更大的负载。每一个发电机都可以全负载或接近全负载的工

作，因此电压的输出基本上就是连续的；根据需求，单个的发电机可以在整个系统中加入或取消。

12.6 三相系统的功率测量

12.6.1 瓦特计的使用

在着手讨论三相系统中功率测量的专门技术以前，简要地考虑一下瓦特计如何在单相电路中使用，是很有帮助的。

功率的测量通常是在频率低于几百赫兹的时候，使用有两个分离线圈的瓦特计来进行。其中一个线圈是用粗线绕成，电阻非常低，称为电流线圈；第二个线圈由很多圈细线绕成，有相对较高的电阻，称为电压线圈。当然也可以在内部或外部与电压线圈串联别的电阻。转矩加在转动系统上，指针与流过两个线圈的瞬时电流的乘积成正比。但是，由于转动系统的机械惯性，使得所产生的偏转与转矩的平均值成正比。

功率计连接在网络里的方法是，使流过电流线圈的电流就是流过网络的电流，电压线圈的电压就是网络的两个端点的电压。这样，电压线圈里的电流就是输入的电压除以电压线圈电阻得到的。

很明显，瓦特计有四个可使用的端子，为了在表上读出比较准确的数值，必须使这些端子正确连接。更详细地说，假设要测量一个无源网络吸收的功率，电流线圈串联在与负载相连的两根导线之一上，电压线圈接在两根导线之间，通常在电流线圈的靠负载一边。电压线圈的终端通常有箭头指示，如图 12.23(a)所示。每个线圈有两个终端，要仔细观察电压和电流的正确关系。每个线圈的终端一头标为正(+)，如果正电流流过电流线圈的正(+)端，而电压线圈的正端与没有符号的端相连，就可以得到正确的读数。图 12.23(a)所示的网络里，当网络右边吸收功率时，瓦特计就会给出偏向高刻度端的偏量。任何一个线圈反接(不是两个同时)，都会使表针向低刻度端偏转；两个线圈都反接，不会影响读数。

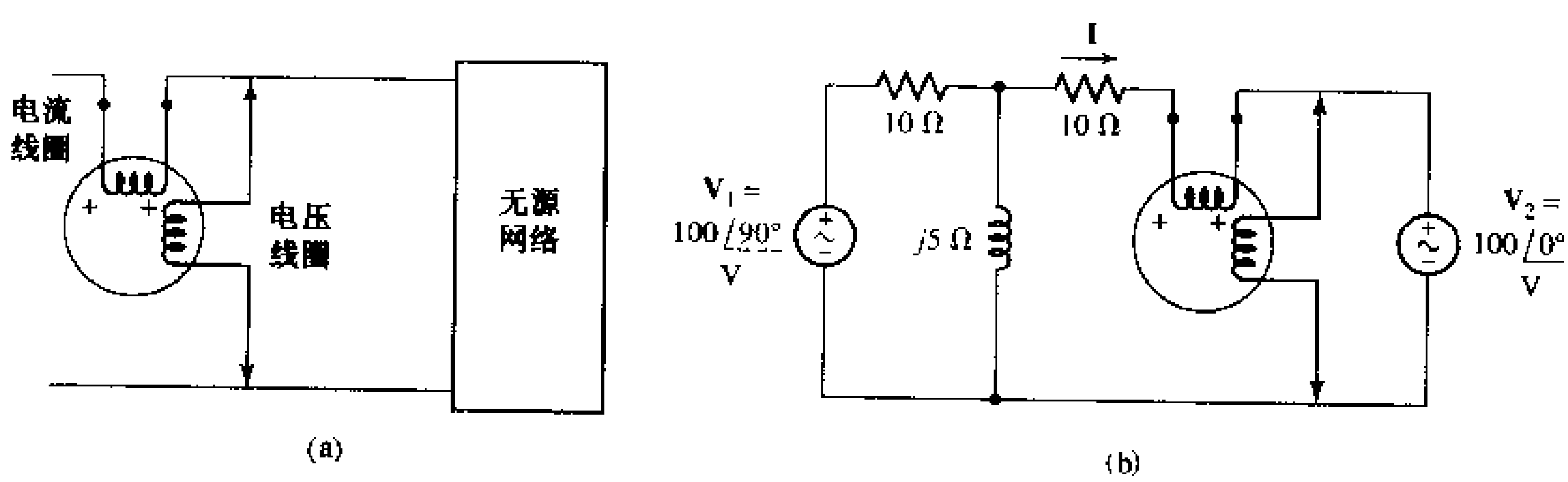

图 12.23 (a)一种瓦特计的连接方法，可以保证在测量无源网络吸收的功率时，是偏向高刻度的读数；(b)用瓦特计来正向指示右边电源吸收功率的例子

作为瓦特计测量平均功率的一个例子，考虑图 12.23(b)所示的电路。瓦特计的接法使得高刻度偏向的读数对应瓦特计右边的网络，即右边电源的吸收功率。右边电源吸收的功率为：

$$P = |\mathbf{V}_2||\mathbf{I}|\cos(\text{ang}\ \mathbf{V}_2 - \text{ang}\ \mathbf{I})$$

利用网孔分析或叠加原理，可以求出电流：

$$\mathbf{I} = 11.18\underline{/153.4^\circ}\ \text{A}$$

因此，吸收的功率为：

$$P = (100) \times (11.18)\cos(0^\circ - 153.4^\circ) = -1\,000\ \text{W}$$

因此，指针就停在负刻度处。实际上，电压线圈的反接比电流线圈快得多，这种反接可以提供一个 1 000 W 的正向读数。

练习

12.9　确定图 12.24 的瓦特计的读数，要获得瓦特计的正向读数，说明电压线圈是否需要反接，并确定消耗或产生该功率的设备。瓦特计的正(+)端应该接在(a)x;(b)y;(c)z。

答案:1 200 W,$P_{6\Omega}$(吸收); 2 200 W,$P_{4\Omega}+P_{6\Omega}$(吸收); 500 W(反接，由 100 V 电源吸收)

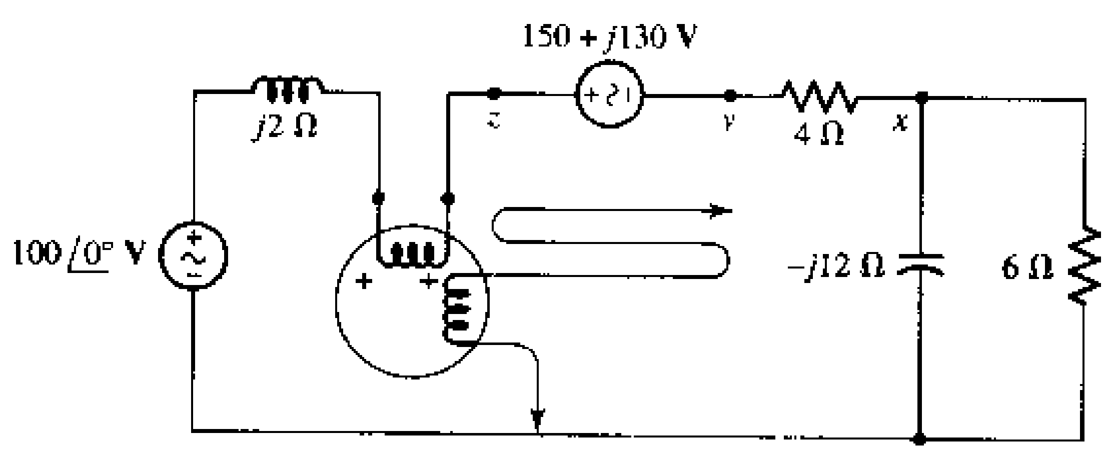

图 12.24

12.6.2　三相系统中的瓦特计

初看之下，三相负载吸收功率的测量好像是很容易的问题。只需在每一相上接一个瓦特计，最后把它们的结果相加。例如，图 12.25(a)所示的 Y 形负载的接法。每一个瓦特计的电流线圈串入一相的负载，电压线圈并接在中线和边线上。同样，瓦特计也可以如图12.25(b)所示的接法来测量 Δ 形负载。这种方法在理论上是正确的，但在实际中是不可行的，因为 Y 形的中线和 Δ 形的相并不总是给出的。例如，一个三相旋转电机只有三个可用的终端，称之为 A, B, C。

显然，需要一种方法来测量只有三个终端的三相负载所吸收的总功率，测量可以在这些终端的"线"的一侧，而不是"负载"侧。这样的方法是很有用的，可以测量不平衡负载从不平衡的电源吸收的功率。把瓦特计连接起来，每个电流线圈串在一条边上，电压线圈接在该边和某一公共点 x 上，如图 12.26 所示。虽然是用 Y 形负载做的图解，其实这对于 Δ 形负载同样适用。点 x 可以是三相系统中一些没有指定的点，或者可以仅仅是空间中的一点，在这里三个电压线圈有一个公共的交点。

瓦特计 A 所指示的平均功率为：

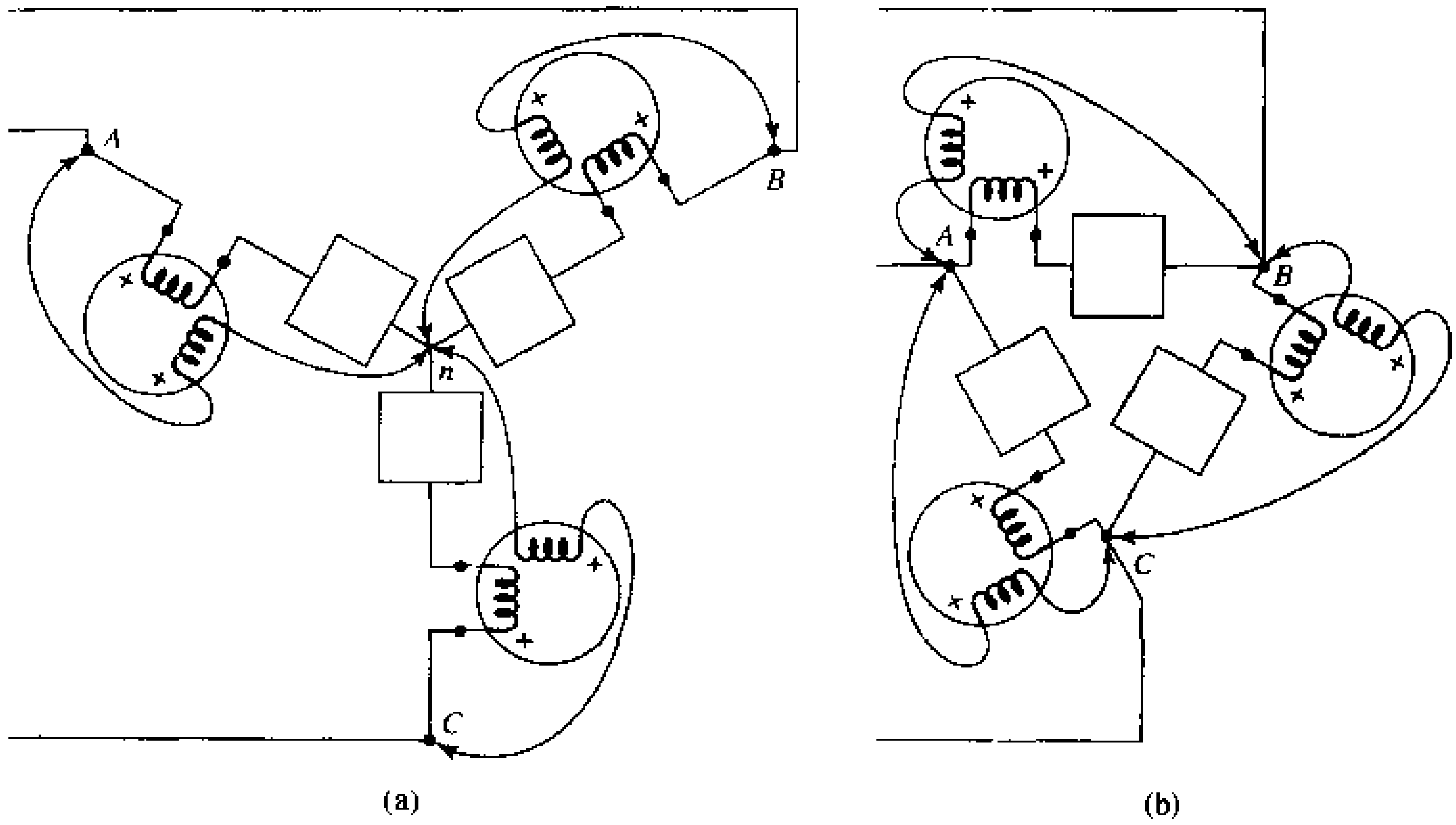

图 12.25 三个瓦特计，每个测量三相负载的单相吸收功率，它们的总和就是总功率。(a)Y形负载，电(b)Δ形负载，电源和负载不必是平衡的

$$P_A = \frac{1}{T}\int_0^T v_{Ax} i_{aA} dt$$

这里的 T 是电源电压的周期。其余两个瓦特计的读数可以用相同的表达式给出，所以，负载吸收的总平均功率为：

$$P = P_A + P_B + P_C = \frac{1}{T}\int_0^T (v_{Ax} i_{aA} + v_{Bx} i_{bB} + v_{Cx} i_{cC}) dt$$

上式中三个电压的每一个都可以用相电压以及点 x 和中线之间的电压表示出来：

$$v_{Ax} = v_{AN} + v_{Nx}$$

$$v_{Bx} = v_{BN} + v_{Nx}$$

$$v_{Cx} = v_{CN} + v_{Nx}$$

所以：

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T (v_{AN} i_{aA} + v_{BN} i_{bB} + v_{CN} i_{cC}) dt + \frac{1}{T}\int_0^T v_{Nx}(i_{aA} + i_{bB} + i_{cC}) dt$$

然而，整个三相负载可以看做一个大的节点，根据基尔霍夫电流定律，要求：

$$i_{aA} + i_{bB} + i_{cC} = 0$$

因此：

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T (v_{AN} i_{aA} + v_{BN} i_{bB} + v_{CN} i_{cC}) dt$$

参照电路图可知，这个和数确实是负载的每个相所吸收的功率之和，因此三个瓦特计的读数就代表了整个负载的总功率。

把这个过程用数值例子来解释一下，将发现这三个瓦特计中的一个其实是多余的。假设有一个平衡电源：

$$\mathbf{V}_{ab} = 100\angle 0^\circ \text{ V}$$

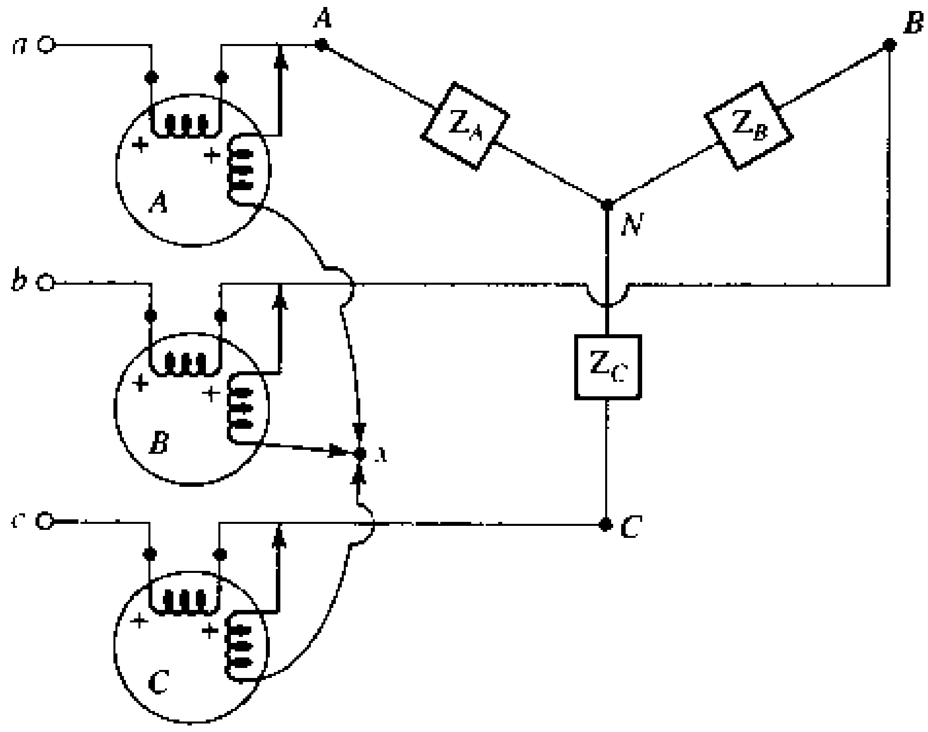

图 12.26　测量三相负载总功率的一种瓦特计接法。仅仅提供了三个负载的终端

$$\mathbf{V}_{bc} = 100\angle -120^\circ \text{ V}$$
$$\mathbf{V}_{ca} = 100\angle -240^\circ \text{ V}$$

或

$$\mathbf{V}_{an} = \frac{100}{\sqrt{3}}\angle -30^\circ \text{ V}$$
$$\mathbf{V}_{bn} = \frac{100}{\sqrt{3}}\angle -150^\circ \text{ V}$$
$$\mathbf{V}_{cn} = \frac{100}{\sqrt{3}}\angle -270^\circ \text{ V}$$

和一个非平衡的负载：

$$\mathbf{Z}_A = -j10\ \Omega$$
$$\mathbf{Z}_B = j10\ \Omega$$
$$\mathbf{Z}_C = 10\ \Omega$$

假设瓦特计为理想的，连接方法如图 12.26 所示，点 x 在源 n 的中线上。用网孔分析法可以求出三个线电流：

$$\mathbf{I}_{aA} = 19.32\angle 15^\circ \text{ A}$$
$$\mathbf{I}_{bB} = 19.32\angle 165^\circ \text{ A}$$
$$\mathbf{I}_{cC} = 10\angle -90^\circ \text{ A}$$

两个中线的电压为：

$$\mathbf{V}_{nN} = \mathbf{V}_{nb} + \mathbf{V}_{BN} = \mathbf{V}_{nb} + \mathbf{I}_{bB}(j10) = 157.7\angle -90^\circ$$

每个瓦特计所指示的平均功率可以算出来为：

$$P_A = V_p I_{aA}\cos(\text{ang } \mathbf{V}_{an} - \text{ang } \mathbf{I}_{aA})$$
$$= \frac{100}{\sqrt{3}} \times 19.32\cos(-30^\circ - 15^\circ) = 788.7 \text{ W}$$

$$P_B = \frac{100}{\sqrt{3}} \times 19.32\ \cos(-150° - 165°) = 788.7\ \mathrm{W}$$

$$P_C = \frac{100}{\sqrt{3}} \times 10\ \cos(-270° + 90°) = -577.4\ \mathrm{W}$$

即总功率为 1 kW。既然电阻负载中流过了 10 A 的有效电流，负载所消耗的总功率就是：

$$P = 10^2 \times (10) = 1\ \mathrm{kW}$$

两个方法得出的结果是吻合的。

注意到其中一个瓦特计的读数是负的。前面的关于瓦特计的基本使用中已指出，只有在电流线圈或电压线圈反接时，表头上才能得到有效的读数。

12.6.3 双瓦特计的方法

已经证明了三个电压线圈的公共交点 x 可以取在任意的地方而又不影响三个瓦特计读数的代数和。下面考虑一下把点 x 直接取在一个边上会有什么影响。例如，如果每个电压线圈的一端都接在 B 点，那么瓦特计 B 的电压线圈里就不会有压降，该指针就会指零，因此它就可以移去，其余两个剩下的瓦特计读数的代数和仍然是负载所吸收的总功率。当这样取点 x 时，则称这种测量功率的方法为双瓦特计法。读数的总和表示了总功率，以下的情况均适合：(1)负载不平衡；(2)源不平衡；(3)瓦特计不同；(4)周期性源的波形不同。所做的惟一的假设就是瓦特计的误差很小，以至于可以忽略。例如，在图 12.26 中，每一个瓦特计的电流线圈通过的是负载吸收的线电流加上电压线圈上流过的电流。由于后者的电流非常小，由电压线圈的电阻和它两端的电压可以估计出它的影响。根据这两个量的大小可以对电压线圈的功率损耗做精确地估计。

在上面数值例子的描述里，假设使用两个瓦特计，一个的电流线圈在线 A，而它的电压线圈在线 A 和线 B 之间，另一个的电流线圈在线 C、电压线圈在线 C 和线 B 之间。那么第一个瓦特计的读数为：

$$\begin{aligned} P_1 &= V_{AB} I_{aA} \cos(\mathrm{ang}\ \mathbf{V}_{AB} - \mathrm{ang}\ \mathbf{I}_{aA}) \\ &= 100 \times (19.32)\cos(0° - 15°) \\ &= 1\ 866\ \mathrm{W} \end{aligned}$$

第二个读数为：

$$\begin{aligned} P_2 &= V_{CB} I_{cC} \cos(\mathrm{ang}\mathbf{V}_{CB} - \mathrm{ang}\mathbf{I}_{cC}) \\ &= 100 \times (10)\ \cos(60° + 90°) \\ &= -866\ \mathrm{W} \end{aligned}$$

所以：

$$P = P_1 + P_2 = 1\ 866 - 866 = 1\ 000\ \mathrm{W}$$

该结果与前面给出的结果一样。

在平衡负载的情况下，双瓦特计法既可以求出 PF 角，也可以求出负载的总功率。假设一个负载阻抗具有相角 θ；可以是一个 Y 形或 Δ 形的接法，在这里假设是 Δ 形接法的负载，如图 12.27 所示。

如图 12.19 所示的标准的相量图，可以求出线电压和线电流之间的相角。得到读数为：

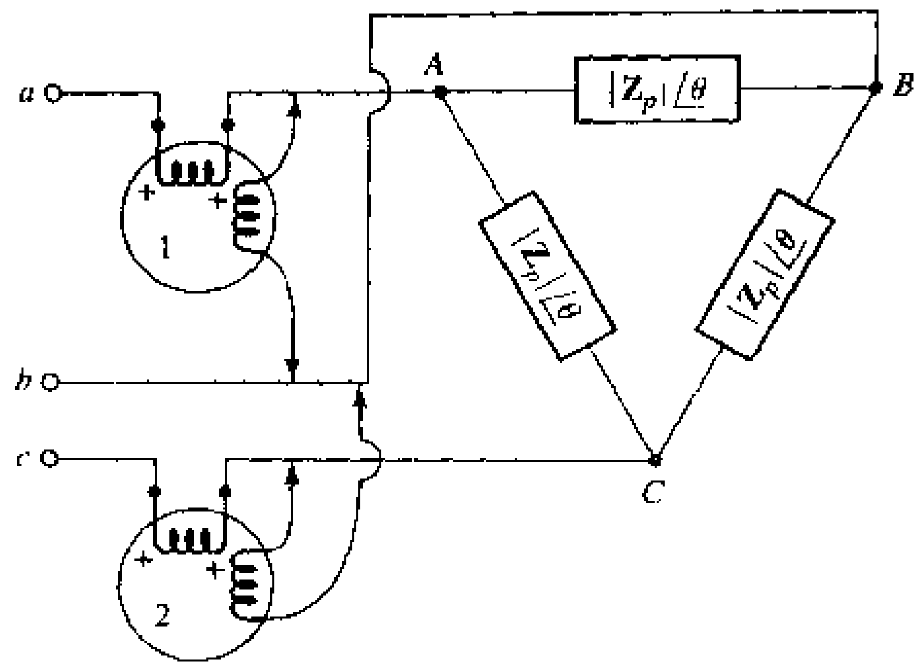

图 12.27 用两个瓦特计来读取平衡三相负载吸收的总功率

$$P_1 = |\mathbf{V}_{AB}||\mathbf{I}_{aA}|\cos(\text{ang}\,\mathbf{V}_{AB} - \text{ang}\,\mathbf{I}_{aA}) = V_L I_L \cos(30° + \theta)$$

和

$$P_2 = |\mathbf{V}_{CB}||\mathbf{I}_{cC}|\cos(\text{ang}\,\mathbf{V}_{CB} - \text{ang}\,\mathbf{I}_{cC}) = V_L I_L \cos(30° - \theta)$$

两个瓦特计读数的比值为：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\cos(30° + \theta)}{\cos(30° - \theta)} \tag{12.5}$$

如果把余弦函数展开，这个等式就可以用简单的 $\tan\theta$ 来表示：

$$\tan\theta = \sqrt{3}\,\frac{P_2 - P_1}{P_2 + P_1} \tag{12.6}$$

这样，相等的瓦特计读数说明负载的 PF 为 1，数值相等而符号相反的读数则说明是纯电抗性负载；P_2 的读数比 P_1 大，说明是感性负载；P_2 的读数比 P_1 小，说明是容性负载。怎样知道哪一个瓦特计的读数是 P_1，哪一个是 P_2 呢？事实上，P_1 在线 A 上，P_2 在线 C 上，正相序列系统使得 V_{an}滞后于 V_{cn}。这就足可以区分两个瓦特计了，但在实际应用中却不是这么容易。即使不能区分出它们两个来，但已经知道了相角的大小，只是不知它们的符号。这个信息已经足够了；如果负载是一个感应式电动机，相角必定是正的，不需要做任何测试来确定哪个读数是哪一个。如果没有前面关于负载的假设，有几种方法来解决这个模糊的信息。最简单的方法是，包括并联一个高阻抗的电抗性负载（一个三相电容在未知负载上）。负载就会变得更显容性。这样，如果 $\tan\theta$ 的大小（或 θ 的大小）减少，那么负载就是感性负载，如果 $\tan\theta$ 的大小增加，说明原先的负载是容性的。

例题 12.7 图 12.28 所示的平衡负载，由一个平衡的三相系统供电，有效电压 $\mathbf{V}_{ab} = 230/\underline{0°}$ V 且是正相序列。求每个瓦特计的读数和负载吸收的总功率

瓦特计 1 的电压线圈用来测电压 $\mathbf{V}_{ac}$，它的电流线圈用来测量相电流 $\mathbf{I}_{aA}$。已知是正相序列，所以线电压为：

$$\mathbf{V}_{ab} = 230\underline{/0^\circ}\ \text{V}$$
$$\mathbf{V}_{bc} = 230\underline{/-120^\circ}\ \text{V}$$
$$\mathbf{V}_{ca} = 230\underline{/120^\circ}\ \text{V}$$

注意，$\mathbf{V}_{ac} = -\mathbf{V}_{ca} = 230\underline{/-60^\circ}$ V。

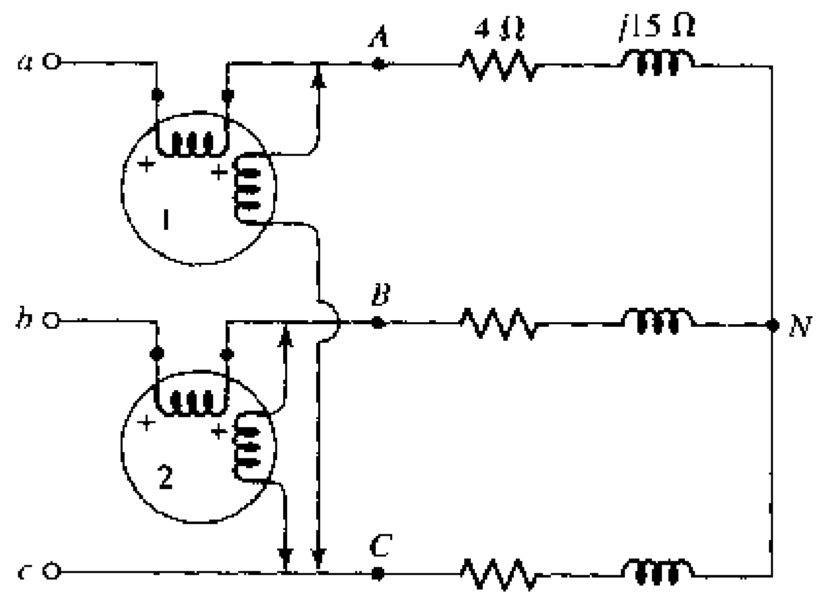

图 12.28 平衡三相系统连接在平衡三相负载上，负载的功率使用双瓦特计方法测量

相电流 $\mathbf{I}_{aA}$ 可以由相电压 $\mathbf{V}_{an}$ 除以相阻抗 $4+j15\ \Omega$ 给出：

$$\mathbf{I}_{aA} = \frac{\mathbf{V}_{an}}{4+j15} = \frac{(230/\sqrt{3})\underline{/-30^\circ}}{4+j15}\ \text{A}$$
$$= 8.554\underline{/-105.1^\circ}\ \text{A}$$

现在计算瓦特计 1 所测量的功率：

$$P_1 = |\mathbf{V}_{ac}||\mathbf{I}_{aA}|\cos(\text{ang }\mathbf{V}_{ac} - \text{ang }\mathbf{I}_{aA})$$
$$= (230)\times(8.554)\cos(-60^\circ + 105.1^\circ)\ \text{W}$$
$$= 1\,389\ \text{W}$$

用同样的方法，可以求出：

$$P_2 = |\mathbf{V}_{bc}||\mathbf{I}_{bB}|\cos(\text{ang }\mathbf{V}_{bc} - \text{ang }\mathbf{I}_{bB})$$
$$= (230)\times(8.554)\cos(-120^\circ - 134.9^\circ)\ \text{W}$$
$$= -512.5\ \text{W}$$

因此，负载吸收的总功率为：

$$P = P_1 + P_2 = 876.5\ \text{W}$$

练习

12.10 在如图 12.26 所示电路中，设负载 $Z_A = 25\underline{/60^\circ}\ \Omega$，$Z_B = 50\underline{/-60^\circ}\ \Omega$，$Z_C = 50\underline{/60^\circ}\ \Omega$，$\mathbf{V}_{AB} = 600\underline{/0^\circ}$ V rms 且为正相序列，点 x 设在 C 处，求：(a) P_A；(b) P_B；(c) P_C。

答案：0；7 200 W；0

12.7　小结与复习

- 大部分的发电厂都是以三相电的形式提供电能。
- 北美的大多数居民用电是以单相交流电的形式，频率为 60 Hz，电压的有效值为 115 V。
- 三相电源可以是 Y 形或 Δ 形连接。两种类型都有三个终端，每个终端是一个相，Y 形接法的源可以有一个中线。
- 在一个平衡的三相系统中，每个相电压数值相等，但是相角与其他两个都相差 120°。
- 三相系统中的负载既可以是 Y 形连接也可以是 Δ 形连接。
- 在一个平衡的 Y 形连接的正相序列（abc）的电源中，线电压为：

$$\mathbf{V}_{ab}=\sqrt{3}V_p\angle 30^\circ \qquad \mathbf{V}_{bc}=\sqrt{3}V_p\angle 90^\circ$$

$$\mathbf{V}_{ca}=\sqrt{3}V_p\angle -210^\circ$$

相电压为：

$$\mathbf{V}_{an}=V_p\angle 0^\circ \qquad \mathbf{V}_{bn}=V_p\angle -120^\circ \qquad \mathbf{V}_{cn}=V_p\angle -240^\circ$$

- 在带有 Y 形负载的系统里，线电流与相电流相等。
- 在 Δ 形接法的电源中，线电压与相电压相等.
- 具有正相序列和平衡 Δ 形负载的平衡系统中，线电流为：

$$\mathbf{I}_a=\mathbf{I}_{AB}\sqrt{3}\angle -30^\circ \qquad \mathbf{I}_b=\mathbf{I}_{BC}\sqrt{3}\angle -150^\circ \qquad \mathbf{I}_c=\mathbf{I}_{CA}\sqrt{3}\angle +90^\circ$$

相电流是：

$$\mathbf{I}_{AB}=\frac{\mathbf{V}_{AB}}{\mathbf{Z}_\Delta}=\frac{\mathbf{V}_{ab}}{\mathbf{Z}_\Delta} \qquad \mathbf{I}_{BC}=\frac{\mathbf{V}_{BC}}{\mathbf{Z}_\Delta}=\frac{\mathbf{V}_{bc}}{\mathbf{Z}_\Delta} \qquad \mathbf{I}_{CA}=\frac{\mathbf{V}_{CA}}{\mathbf{Z}_\Delta}=\frac{\mathbf{V}_{ca}}{\mathbf{Z}_\Delta}$$

- 大多数功率计算都是建立在单相的基础上，假定系统为平衡的；此外，节点和网孔分析法也是有效的方法。

习题

1. 用伏特计测量一个电路，其结果是 $V_{be}=0.7$ V，$V_{ce}=10$ V。求：V_{bc}，V_{eb}，V_{cb}。
2. 用 SPICE 工具模拟一个共源场效应管放大器。(a)如果 $V_{gs}=-1$ V 且 $V_{ds}=5$ V，求 V_{gd}；(b)如果 $V_{ds}=4$ V 且 $V_{gd}=2.5$ V，求 V_{sg}。
3. 一个六相的电源系统给一个大电流的直流磁铁供电。写出下列情况的相电压：(a)正相序列；(b)负相序列。
4. 如果 $\mathbf{V}_{xy}=110\angle 20^\circ$ V，$\mathbf{V}_{zx}=160\angle -50^\circ$ V，$\mathbf{V}_{ay}=80\angle 130^\circ$ V，求：(a) V_{yz}；(b) V_{az}；(c) V_{zx}/V_{xy}。
5. 在一个特殊的电路里，已知 $\mathbf{V}_{12}=100\angle 0^\circ$，$\mathbf{V}_{45}=60\angle 75^\circ$，$\mathbf{V}_{42}=80\angle 120^\circ$，$\mathbf{V}_{35}=-j120$，单位都是 V。求：(a)$\mathbf{V}_{25}$；(b)$\mathbf{V}_{13}$。
6. 有效值为 230/460 V，频率为 60 Hz 的三相系统如图 12.29 所示，给三个负载供电：负载 AN 吸收的功率是 $10\angle 40^\circ$ kVA，负载 NB 吸收的功率是 $8\angle 10^\circ$ kVA，负载 AB 吸收的功率是 $4\angle -80^\circ$ kVA。求两个线电流和中线电流。

7. 一个平衡三线单相系统，负载是 $\mathbf{Z}_{AN} = \mathbf{Z}_{NB} = 10\ \Omega$，$\mathbf{Z}_{AB} = 16 + j12\ \Omega$。三线电阻可以忽略不计，令 $\mathbf{V}_{an} = \mathbf{V}_{nb} = 120\angle 0^\circ$ V。(a)求 I_{aA} 和 I_{nN}；(b)在 $\mathbf{Z}_{AN}$ 上并联一个 10 Ω 电阻，则系统就不平衡了。求：I_{aA}，I_{nN} 和 I_{bB}。
8. 一个低效率的三线单相系统，源电压是 $\mathbf{V}_{an} = \mathbf{V}_{nb} = 720\angle 0^\circ$ V。线电阻是 $R_{aA} = R_{bB} = 1\ \Omega$，$R_{nN} = 10\ \Omega$，负载 $\mathbf{Z}_{AN} = 10 + j3\ \Omega$，$\mathbf{Z}_{NB} = 8 + j2\ \Omega$，$\mathbf{Z}_{AB} = 18 + j0\ \Omega$。求：(a)$\mathbf{I}_{aA}$；(b)$\mathbf{I}_{nN}$；(c)$P_{\text{wiring, total}}$；(d)$P_{\text{gen, total}}$。
9. 如图 12.30 所示的平衡三线单相系统里，令 $V_{AN} = 220$ V，频率 60 Hz。(a)电容 C 为多大时，可以使负载的功率因数为 1；(b)C 要处理多少 kVA 的功率？

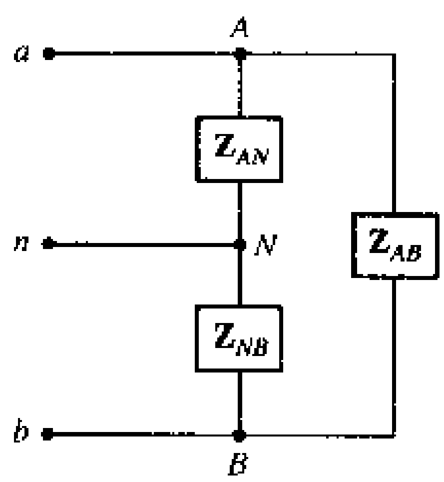

图 12.29

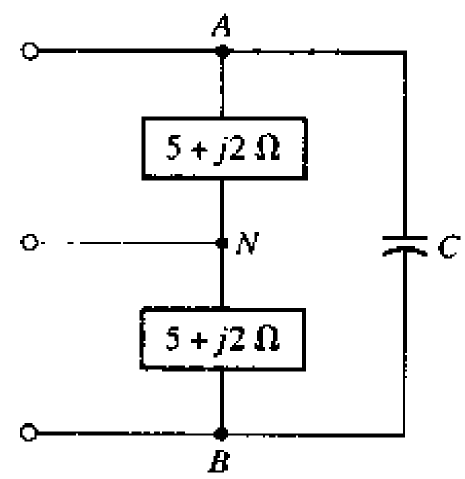

图 12.30

10. 如图 12.29 所示的平衡三线单相系统中，源电压 $\mathbf{V}_{an} = \mathbf{V}_{nb} = 200\angle 0^\circ$ V。线与中线的电阻为零，负载 $\mathbf{Z}_{AN} = \mathbf{Z}_{NB} = 12 + j3\ \Omega$。求：$\mathbf{Z}_{AB}$使得(a) $X_{AB} = 0$ 且 $I_{aA} = 30$ A rms；(b) $R_{AB} = 0$ 和相角 $\mathbf{I}_{aA} = 0^\circ$。
11. 图 12.31 给出了一个正相序列的平衡三相三线系统，$\mathbf{V}_{BC} = 120\angle 60^\circ$ V，$R_w = 0.6\ \Omega$。如果总负载(包括导线电阻)吸收 5 kVA 的功率，设 PF = 0.8(滞后)。求：(a)线电阻所消耗的总功率；(b)$\mathbf{V}_{an}$。

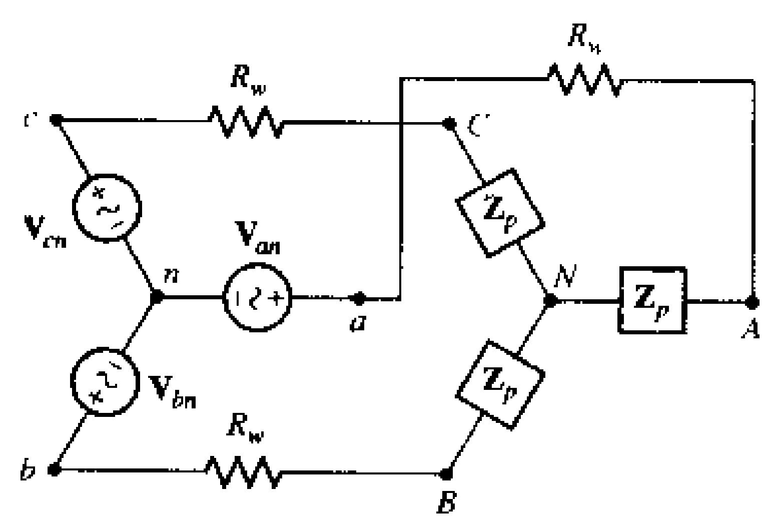

图 12.31

12. 设图 12.31 所示的平衡系统中，$\mathbf{V}_{an} = 2\ 300\angle 0^\circ$，$R_w = 2\ \Omega$。假设为正相序列，提供的复总功率为 $\mathbf{S} = 100 + j30$ kVA。求：(a)$\mathbf{I}_{aA}$；(b)$\mathbf{V}_{AN}$；(c)$\mathbf{Z}_p$；(d)传输效率。
13. 如图 12.31 所示的平衡三相系统，令 $\mathbf{Z}_p = 12 + j5\Omega$，$\mathbf{I}_{bB} = 20\angle 0^\circ$ A，为正相序列。如果电源的功率因数为 0.935，求：(a)R_w；(b)$\mathbf{V}_{bn}$；(c)$\mathbf{V}_{AB}$；(d)电源所提供的复功率。

14. 三相三线系统有一个平衡的Y形负载,负载为一个75 Ω的电阻、一个125 mH的电感和一个55 μF的电容分别串连在一个边与中点之间。假设正相序列 $V_p = 125$ V,频率60 Hz,求线电流、负载的总功率和负载的功率因数。

15. 一个无损耗的中线导体接在图12.31所示的三相系统的 n 和 N 之间,假设是平衡的正相序列系统,但负载是不平衡的:$\mathbf{Z}_{AN} = 8 + j6\ \Omega$, $\mathbf{Z}_{BN} = 12 - j16\ \Omega$, $\mathbf{Z}_{CN} = 5\ \Omega$。如果 $\mathbf{V}_{an} = 120\,\underline{/0^\circ}$ V, $R_w = 0.5\ \Omega$。求 $\mathbf{I}_{nN}$。

16. 如图12.31所示的平衡电路,$\mathbf{V}_{an} = 40\,\underline{/0^\circ}$ V(正相序列)。若相阻抗 $\mathbf{Z}_p = 5 + j10\ \Omega$ 求在下列情况下的线电流和负载的总功率:(a) $R_w = 0\ \Omega$;(b) $R_w = 3\ \Omega$。

17. 如图12.31所示的系统的相阻抗 $\mathbf{Z}_p$ 为一个 $75\,\underline{/25^\circ}\ \Omega$ 的阻抗和一个25 μF的电容的并联。令 $\mathbf{V}_{an} = 240\,\underline{/0^\circ}$ V,频率60 Hz, $R_w = 2\ \Omega$。求:(a) $\mathbf{I}_{aA}$;(b) P_{wires};(c) P_{load};(d)电源的功率因数。

18. 图12.31所示的电路的每一个负载包含一个 $100\,\underline{/28^\circ}\ \Omega$ 的感抗和一个500 μF的电容的并联,电阻 $R_w = 1\ \Omega$。使用正相序列 $\mathbf{V}_{ab} = 240\,\underline{/0^\circ}$ V,频率 $f = 50$ Hz,求出线电流的有效值、负载的总功率以及导线上损失的功率。用适当的PSpice仿真验证你的答案。

19. 图12.31所示的平衡三相系统,每个相的 $R_w = 0$, $\mathbf{Z}_p = 10 + j5\ \Omega$。(a)该电源的功率因数是多少?(b)假设 $f = 60$ Hz,要使PF达到0.93并滞后,要选择多大的电容与每一相的阻抗并联?(c)如果负载的相电压是440 V,每一个电容的功率是多少?

20. 图12.31所示的电路的每一个负载是由一个1.5 H的电感与100 μF的电容和1 kΩ的电阻并联而成,$R_w = 0\ \Omega$。正相序列,$\mathbf{V}_{ab} = 115\,\underline{/0^\circ}$ V, $f = 60$ Hz。求线电流的有效值以及负载的总功率。使用适当的PSpice仿真验证你的答案。

21. 图12.32给出一个平衡的三相三线电路。令 $R_w = 0$, $\mathbf{V}_{an} = 200\,\underline{/60^\circ}$ V。负载每个相吸收的功率是复数,$\mathbf{S}_p = 2 - j1$ kVA。假设是正相序列,求:(a) $\mathbf{V}_{bc}$;(b) $\mathbf{Z}_p$;(c) $\mathbf{I}_{aA}$。

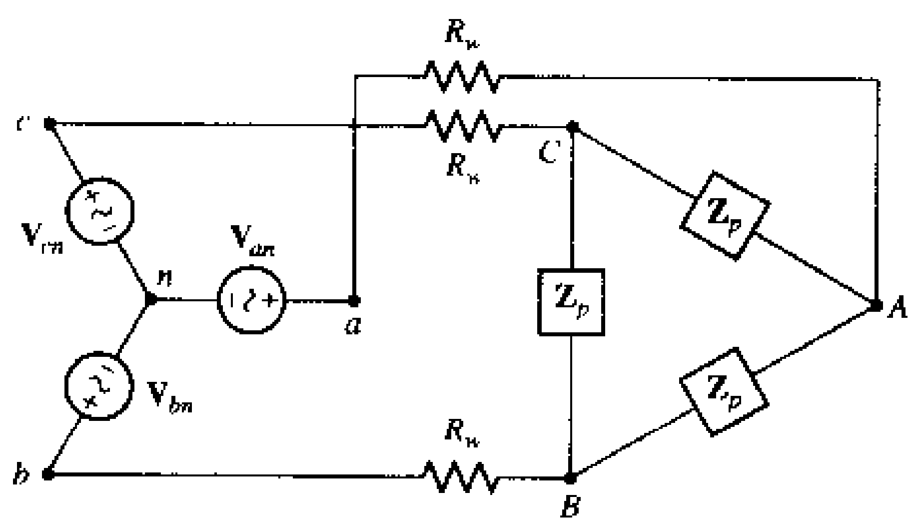

图12.32

22. 图12.32所示的平衡Δ形负载要求15 kVA,功率因数为0.8(滞后)。假设正相序列,$\mathbf{V}_{BC} = 180\,\underline{/30^\circ}$ V。如果 $R_w = 0.75\ \Omega$。求:(a) $\mathbf{V}_{bc}$;(b)电源所提供的总的复功率。

23. 如图12.33所示的平衡三相系统,负载吸收的总的复功率为 $3 + j1.8$ kVA,而电源产生 $3.45 + j1.8$ kVA的功率。如果 $R_w = 5\ \Omega$。求:(a) I_{aA};(b) I_{AB};(c) V_{an}。

24. 如图12.33所示的电路,Δ形负载吸收1 800 W的功率,功率因数为 $\sqrt{2}/2$(滞后),导线